干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.03.13

石羊河下游人工梭梭林土壤呼吸变化特征及其与水热因子的关系①

王新友[1,2]， 马全林[3]， 靳虎甲[3]， 樊宝丽[3]， 张进虎[3]， 林慧龙[1]

（1 草地农业生态系统国家重点实验室/农业部草牧业创新重点实验室/兰州大学草地农业科技学院/中国草业发展战略研究中心，甘肃 兰州 730020； 2 甘肃广播电视大学，甘肃 兰州 730030； 3 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地，甘肃省治沙研究所，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 土壤呼吸不仅是反映土壤生物活性的重要指标，也是全球碳循环研究中备受关注的热点问题。在地处典型干旱区的石羊河下游，以流动沙丘和去除土壤结皮人工梭梭林为对照，采用 LI－8100 土壤碳通量监测系统研究了栽植约 40 a、30 a、10 a 和 5 a 的人工梭梭林生长季和非生长季的土壤呼吸日变化，并分析了土壤水分和温度对土壤呼吸的影响。结果表明：(1) 不同林龄梭梭林生长季和非生长季土壤呼吸速率的日变化均为明显的单峰曲线，且呈现出一定的波动性，日最大排放速率出现在 12:00～14:00 时，最小值出现在 8:00 时左右。(2) 梭梭林营造和去结皮处理显著提高了沙漠土壤呼吸速率，而且不同林龄土壤呼吸速率大体上随着种植年限的增加而递增，表现为 $MC > 40\ a > 30\ a > 10\ a > MS > 5\ a$，非生长季表现为 $MC > 40\ a > 10\ a > 5\ a > 30\ a > MS$。(3) 不同林龄梭梭林土壤呼吸速率均具有明显的季节变化特征，生长季（8 月）的土壤呼吸作用明显强于非生长季（1 月）。(4) 相关性分析表明，生长季和非生长季土壤呼吸均与 0～5 cm 土壤水分显著相关，且均呈二次曲线关系，分别为 $Y = -0.2058X^2 + 0.9465X - 0.3166$ ($R^2 = 0.5062$, $P = 0.0417$) 和 $Y = 0.1187X^2 + 0.1563X + 0.1188$ ($R^2 = 0.6757$, $P = 0.0011$)；但与 10 cm 土壤温度的相关性不显著，土壤水分是影响人工梭梭林土壤呼吸的关键因素。该研究进一步证明了人工梭梭林的营造有效改善了沙漠土壤的生物活性，提高了土壤碳通量水平，以土壤结皮破坏为基本特征的人工梭梭林退化和沙漠化必然在短期内加剧碳排放。因此，需要在沙漠地区合理营造人工林，并在造林和林业管理过程中注意保护土壤结皮，以减少 CO_2 排放。

关 键 词： 人工梭梭林；土壤呼吸；石羊河下游；日变化

文章编号： 1000－6060(2019)03－0570－11(0570～0580)

土壤呼吸是指通过土壤呼吸作用向大气释放 CO_2 的过程，是导致全球气候变化的关键性生态学过程，已成为全球碳循环研究中备受关注的核心问题[1]。土壤呼吸排放的 CO_2 是决定陆地生态系统碳平衡的主要因子[2]，土壤呼吸速率直接影响土壤碳汇。因而，研究土壤呼吸对于土壤碳循环的作用、并进一步探讨其对全球变化的影响将具有十分重要的意义[3]。对于干旱地区而言，土壤呼吸是土壤碳损失的主要生态过程之一[4]，能够反映生态系统对环境胁迫的响应。因此，研究干旱地区荒漠生态系统土壤碳排放规律，既是评价荒漠生态系统中能量转化和土壤生物活性的一个重要指标[4]，又对确定这一区域在碳循环中的“源—汇”功能也有重要价值[5]。

梭梭林（*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge.）是中亚荒漠中分布最广的荒漠植被类型，在维持西部生态安全和环境稳定中发挥着十分重要的作用[6]。目前已经有学者对准噶尔盆地[7－9]、古尔班通古特南缘[10－11]、艾比湖流域[12]，以及三工河流域[13－14]的天然梭梭林在生长季或非生长季的土

① 收稿日期：2018－12－02； 修订日期：2019－03－11
基金项目：国家自然科学基金项目(31660232)；甘肃省基础研究创新群体项目(145RJIA335)
作者简介：王新友(1981－)，男，博士研究生，副教授，主要从事荒漠生态学、草业经济与社会发展研究. E-mail:254950602@qq.com
通讯作者：马全林(1974－)，男，博士后，研究员，主要从事荒漠生态学研究. E-mail:mql925@126.com

壤呼吸变化特征进行了研究,而未见对人工梭梭林土壤呼吸的相关研究报道。梭梭分枝多、耐瘠薄、抗旱性极强,是干旱荒漠区的优良固沙植物,成为干旱区固沙造林面积最大的树种[15]。在石羊河下游的民勤,自 20 世纪 60 年代开始,梭梭从新疆引入民勤成为民勤固沙林的主要树种,占到人工固沙林总面积的 51.5%,对保护民勤绿洲发挥着难以估量的作用,但由于地下水位下降导致其出现不同程度的退化,甚至局部出现沙丘活化[16]。梭梭林从栽植到衰败的演替过程不仅涉及生物、土壤水文和理化性质变化[6-8],也有碳循环的变化,但其演替过程的碳固定、CO_2 排放等碳循环研究少见报道。研究人工梭梭林演替过程中的土壤呼吸规律及其变化机制,能为干旱区碳循环的研究提供基础实验数据,并为梭梭的保护与恢复提供科学依据。

1 研究区概况

石羊河下游的甘肃省民勤县(38°05′~39°06′N,103°02′~104°02′E),属于我国典型的绿洲型荒漠化地区,东、西、北三面被腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠所包围,气候属温带荒漠气候,多年平均气温为 7.6 ℃,年均降水量为 113.2 mm,年均蒸发量为 2 604.3 mm,年均风速 2.8 m·s^{-1}。该区的地表水资源由 20 世纪 50 年代的 5.731×10^{8} m^{3} 减少到 21 世纪初期的 1.0×10^{8} m^{3} 左右。近 20 a 来,由于地下水的持续大规模过度开采利用和石羊河上中游水资源消耗提高,石羊河下游地区的地下水埋深由 1961 年的 2.21 m 下降到目前的近 20 m。土壤多为风沙土,养分贫瘠且风蚀严重。沙地植被中胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* Linn.)已全部枯死,人工梭梭种群(*Haloxylon ammodendron* Bunge.)和天然柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)出现严重衰败,其他固沙植被如天然白刺等(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)也出现不同程度的衰败,土地沙漠化扩展加速,使得该区域成为我国荒漠绿洲区域生态环境问题最为突出的地区之一。

2 样地设置与研究方法

2.1 样地设置

应用空间代替时间的方法,按照人工梭梭林的营造时间,分别选取栽植约 40 a、30 a、10 a 和 5 a 的人工梭梭林样地,并以栽植年限最长的 40 a 梭梭林去结皮处理(*MC*)以及相邻未栽植梭梭的流动沙丘(*MS*)为对照,使用全球定位系统(GPS)对调查地点定位,并记录各样地的海拔高度、地貌及土壤类型等环境因子(表 1)。

2.2 土壤呼吸、地温、土壤含水率测定

土壤呼吸测定分别在 2012 年 8 月 29~31 日(生长季),2013 年 1 月 21~23 日(非生长季)进行,测定期间各气象因子见表 2。与非生长季节相比,干旱区生长季温度高,日照时数大,湿度、风速低。土壤呼吸采用土壤呼吸速率(μmol CO_2·m^{-2}·s^{-1})表示,测定采用开路式土壤碳通量测量系统,测定仪器型号为 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA)。在每个样地内布设 3 个基座(Soil collar),基座为 10 cm 左右的聚氯乙烯(PVC)管,使其出露地面 2 cm。在第一次测定时,提前 1~2 d 在将基座嵌入土壤中,经过大约 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动。日观测频度为间隔 2 h 测定 1 次,观测开始于 8:00,结束于 18:00,其中在每一次观测的时候设置观测记录时间为 90 s,每次 3 个重复。同时用 LI-8100

表 1 不同栽植年限人工梭梭林样地信息

Tab.1 Basic information of artificial *Haloxylon ammodendron* forest with different life stages

样地	梭梭林营造年份	坐标位置		梭梭平均冠幅 / cm		梭梭平均高度 / cm	梭梭生长状况
40 a	1973 年	102°56′56.98″E	38°34′10.84″N	120±15	155±22	192±25	较差
30 a	1985 年	102°56′35.82″E	38°36′50.57″N	108±17	141±19	155±19	较差
10 a	2002 年	102°57′38.20″E	38°36′15.99″N	75±9	78±11	91±12	良好
5 a	2007 年	102°54′45.03″E	38°34′09.71″N	57±8	61±6	62±7	良好
MC	1973 年	102°56′56.90″E	38°34′10.79″N	120±15	155±22	192±25	较差
MS	/	102°56′35.82″E	38°36′50.57″N	/	/	/	/

注:表中所列数据为平均值±标准差

表 2　人工梭梭林生长季和非生长季主要气象因子

Tab. 2　Major meteorological factors in the artificial *Haloxylon ammodendron* forest in the growing and non-growing seasons

		平均气压 / hPa	平均气温 / ℃	平均相对湿度 / %	平均风速 / m·s⁻¹	日照时数 / h
梭梭生长季	2012 年 8 月 29 日	855.60	29.30	29.00	2.50	11.70
	2012 年 8 月 30 日	856.30	27.30	36.00	2.40	10.80
	2012 年 8 月 31 日	863.10	28.60	47.00	2.70	11.30
	平均值 ± 标准差	858.33 ±4.14	28.40 ±1.01	37.33 ±9.07	2.53 ±0.15	11.27 ±0.45
梭梭非生长季	2013 年 1 月 20 日	869.9	-5.3	57.00	1.8	8.9
	2013 年 1 月 21 日	867.2	-4.3	50.00	3.2	8.9
	2013 年 1 月 22 日	867	-5.2	40.00	4.5	8.5
	平均值 ± 标准差	868.03 ±1.62	-4.93 ±0.55	49.00 ±8.54	3.17 ±1.35	8.77 ±0.23

注:表中数据源于中国气象科学数据共享服务网《中国地面国际交换站气候资料日值数据集》

地温监测端口同步测定地下 10 cm 的地温。土壤分 0 ~ 5 cm、5 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 分层取样,土壤含水率(0 ~ 20 cm)用烘干(105 ℃)称重法测得,深层土壤含水率用中子水分仪测定[17]。

2.3　数据处理

实验所得数据采用 Microsoft Excel 软件完成统计分析、日变化均值的计算和绘图。方差分析和相关性分析使用 SPSS19.0 软件,多重比较用邓肯氏(Duncan)新复极差法检验。针对不同林龄的梭梭人工林,对 8:00 ~ 18:00 的 6 组 18 个土壤呼吸数据取平均值,得到土壤呼吸均值。

3　结果与分析

3.1　不同林龄人工梭梭林土壤呼吸日变化特征

不同林龄的梭梭人工林在生长季(8 月份)的土壤呼吸日变化曲线不完全相同,但是日变化动态比较一致,均呈现单峰曲线(图 1)。土壤呼吸的最大值均出现在 12:00,但最小值出现的时间不同,其中 40 a 的最小值出现在 8:00,而其他各样地的最小值均出现在 18:00;各样地最大、最小值变化幅度不一致,其中 *MC* 和 40 a 的最小值相比于最大值分别下降了 50.20%、44.06%,*MS* 的最大值是最小值的 1.48倍,而 10 a、5 a 和 30 a 最小值相对于其最大值只下降了 29.25%、25.63% 和 22.84%。

在非生长季,除 *MS* 外其他各样地在 8:00 的土壤呼吸均为负值,且各样地的最小值均出现在此时刻,而最大值都出现在 12:00 ~ 14:00(图 2);8:00 ~ 10:00 之间土壤各样地土壤呼吸增加缓慢,但各样地 10:00 ~ 12:00 时间段内土壤呼吸均有显著的增加,40 a、30 a、10 a、5 a、*MC* 和 *MS* 样地在 12:00 的土壤呼吸值分别是 10:00 的 6.63 倍、2.39 倍、8.30 倍、2.53 倍、93.50 倍和 5.76 倍;在 12:00 ~ 14:00 时间段内,除 40 a 的土壤呼吸呈下降趋势外,其他各样地土壤呼吸均有明显的增加;14:00 ~ 18:00 各样地的土壤呼吸值均呈现持续减小的趋势。

3.2　不同林龄人工梭梭林土壤呼吸均值比较

对于不同林龄的梭梭人工林在生长季和非生长季的土壤呼吸日变化均值在0.05的显著性水平下

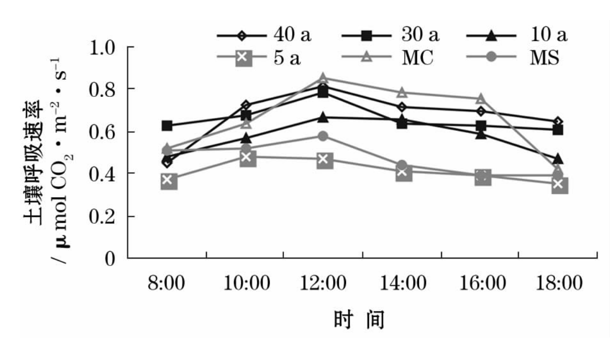


图 1　生长季不同林龄人工梭梭林土壤呼吸日变化

Fig. 1　Diurnal variations of soil respiration of artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in growing season

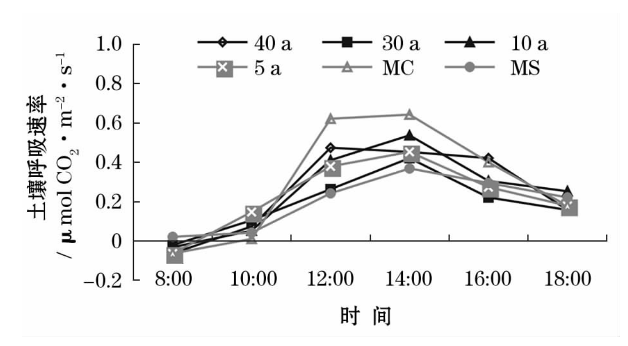


图 2　非生长季不同林龄人工梭梭林土壤呼吸日变化

Fig. 2　Diurnal variations of soil respiration of artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in non-growing season

进行比较发现(图 3、图 4),在生长季节 *MC*、40 a 和 30 a 的土壤呼吸速率要高于其他各样地,但三者之间的土壤呼吸速率差异不显著;10 a 在生长季的土壤呼吸速率均值为 0.570 9 μmol CO_2 · m^{-2} · s^{-1}要小于 *MC*、40 a 和 30 a,但高于 *MS* 和 5 a 样地,其中与 5 a 的差异显著;*MS* 与 5 a 的土壤呼吸速率均显著的小于 *MC*、40 a 和 30 a,其中最小的 5 a 样地其土壤呼吸速率均值仅为 0.413 1 μmol CO_2 · m^{-2} · s^{-1},比最大值 *MC* 样地下降了 28.64%。各样地在非生长季节的土壤呼吸速率日均值大小顺序为:*MC* > 10 a > 40 a > 5 a > *MS* > 30 a,*MC* 分别比 40 a、30 a、10 a 和 5 a 的土壤呼吸日均值提高了 18.02%、55.28%、17.37% 和 31.83%,而 40 a、30 a、10 a 和 5 a 的土壤呼吸速率分别是 *MS* 的 1.28 倍、0.98 倍、1.29 倍和 1.15 倍;经 Duncan 新复极差法检验,各样地的土壤呼吸总体差异不显著($P<0.05$)。

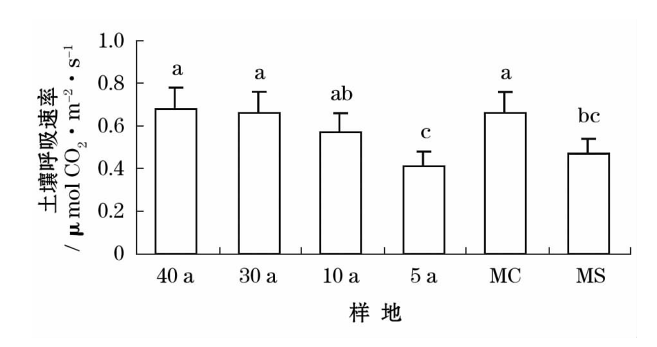


图 3 生长季不同林龄人工梭梭土壤呼吸日变化均值($P<0.05$)

Fig. 3 Diurnal mean value of soil respiration of artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in growing season ($P<0.05$)

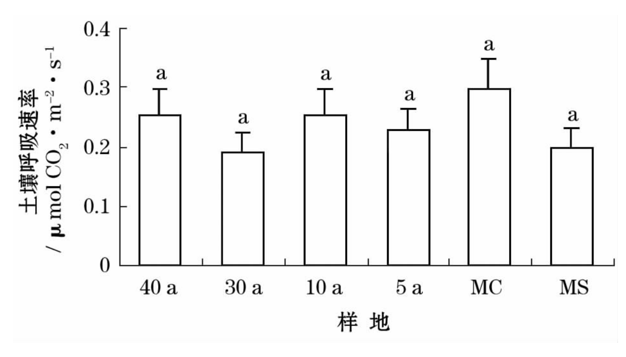


图 4 非生长季不同林龄人工梭梭土壤呼吸日变化均值($P<0.05$)

Fig. 4 Diurnal mean value of soil respiration of artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in non-growing season ($P<0.05$)

3.3 人工梭梭林土壤呼吸的关键影响因素

3.3.1 土壤水分与土壤呼吸的关系 一般而言,土壤含水率通过影响根系呼吸和微生物呼吸以及 CO_2 在土壤中的传输方式影响土壤呼吸强度。由相关性分析结果(表 3)可知,土壤含水率与土壤呼吸速率之间的相关性在生长季和非生长季基本上一致。在生长季节,人工梭梭林土壤呼吸速率与表层 0 ~ 5 cm 土壤含水率达到显著正相关水平。在非生长季节,人工梭梭林土壤呼吸速率与表层 0 ~ 5 m 和 5 ~ 20 cm 土壤含水率达到显著正相关水平。但是,无论生长季,还是非生长季节,20 ~ 100 cm 其他土壤层次与土壤呼吸速率相关性均未达到显著水平。

选择与土壤呼吸相关性达到显著水平的 0 ~ 5 cm 以及 5 ~ 20 cm 土壤含水率与相应的土壤呼吸速率做关系图(图 5、图 6、图 7),由图可知土壤含水率与土壤呼吸速率均呈现二次函数模型,但拟合的二次函数曲线有所差异。

表 3 不同林龄人工梭梭林土壤呼吸速率与各层土壤含水率的相关性

Tab. 3 Relationships between soil respiration of artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages and soil water content at every soil layer

土壤层级	生长季		非生长季	
	P 值	相关系数	*P* 值	相关系数
0 ~ 5 cm	0.041 7	0.594 1*	0.001 1	0.820 4*
5 ~ 20 cm	0.083 1	0.519 9	0.046 7	0.582 8*
20 ~ 40 cm	0.193 1	-0.403 6	0.559 9	-0.187 3
40 ~ 60 cm	0.922 5	-0.031 5	0.197 8	-0.399 8
60 ~ 80 cm	0.223 5	-0.379 6	0.316 7	-0.316 1
80 ~ 100 cm	0.425 5	0.254 1	0.890 2	0.044 7

注:* 相关性达到显著水平 $P<0.05$

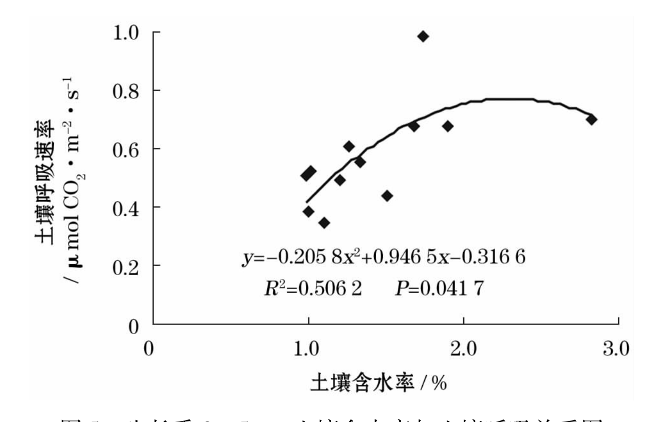


图 5 生长季 0 ~ 5 cm 土壤含水率与土壤呼吸关系图

Fig. 5 Relationships between soil respiration and soil water content at depth of 0 ~ 5 cm in growing season

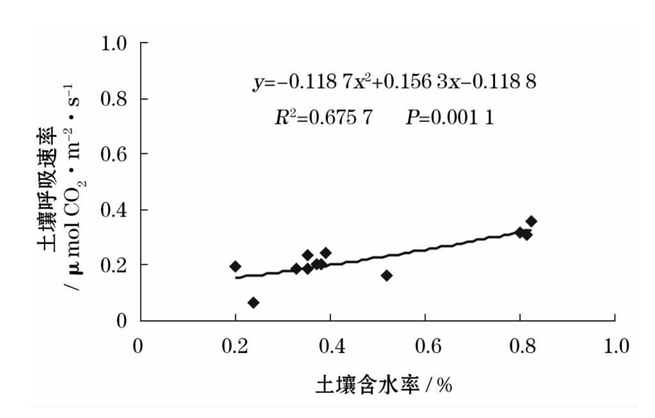


图6 非生长季土壤呼吸与0~5 cm土壤含水率关系图

Fig. 6 Relationships between soil respiration and soil water content at depth of 0~5 cm in non-growing season

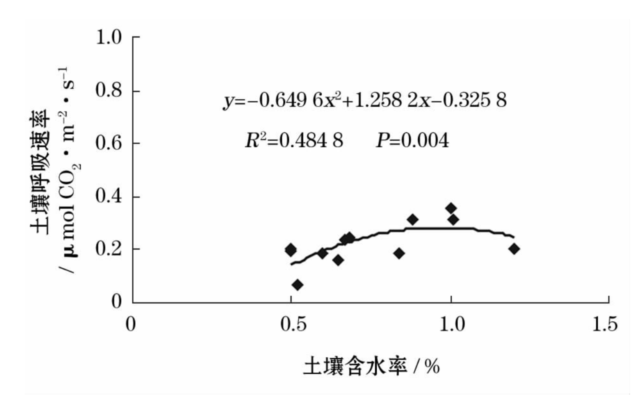


图7 非生长季土壤呼吸与5~20 cm土壤含水率关系图

Fig. 7 Relationships between soil respiration and soil water content at depth of 5~20 cm in non-growing season

生长季(8月)不同林龄的梭梭地下10 cm处土壤温度日变化曲线不完全相同,变化动态也不一致(图8)。40 a、30 a、5 a和*MC*的最大值出现在18:00,而10 a和*MS*的最大值出现在16:00;除40 a和30 a的最小值出现在10:00外,其他各样地的最小值均出现在8:00;8:00~10:00之间,*MS*的土壤温度缓慢上升4.35%,10 a、5 a和*MC*的土壤温度维持不变,而40 a和30 a的土壤温度出现缓慢下降,下降幅度分别为6.12%和5.36%;10:00~12:00之间,除10 a土壤温度保持不变外,各样地土壤温度均增加,但是增长幅度不一致,增长幅度在2%~14%之间。12:00~14:00之间,各样地土壤温度均增加,增长幅度不一致,但是相对于其他时间段较为剧烈,幅度在3.9%~21.6%之间。14:00~16:00之间,除30 a土壤温度出现1.5%的下降外,各样地土壤温度均增加,但增长幅度不一致,增长幅度在6.3%~15.4%之间;16:00~18:00之间,除10 a和*MS*的土壤温度出现1.7%和2.9%的下降外,各样地土壤温度也是均有增加,但是增长幅度不一致,增长幅度在1.6%~6.7%之间;40 a、30 a、10 a、5 a、*MC*、*MS*地下10 cm的温度最高值比最低值分别提高了29%、18.5%、13.6%、33.3%、21.9%、32.4%。

在非生长季,除了*MC*在18:00的土壤温度为0 ℃外,其他各样地在测量时间点的土壤温度均为负值(图9)。不同林龄的梭梭10 cm处土壤温度日变化曲线不完全相同,但变化动态比较一致,均呈现"^"型(向下单峰),且最大值均出现在测量结束的18:00,最小值均出现在10:00;8:00~10:00之间,除40 a的温度不变之外,其余各样地的土壤温度缓慢下降,下降幅度为5.26%~14.28%;10:00~12:00之间,40 a、10 a和*MC*的土壤温度缓慢增加,增长幅度分别为5%、3.3%和5.3%,而30 a、5 a、和*MS*的土壤温度保持不变;12:00~14:00之间,各样

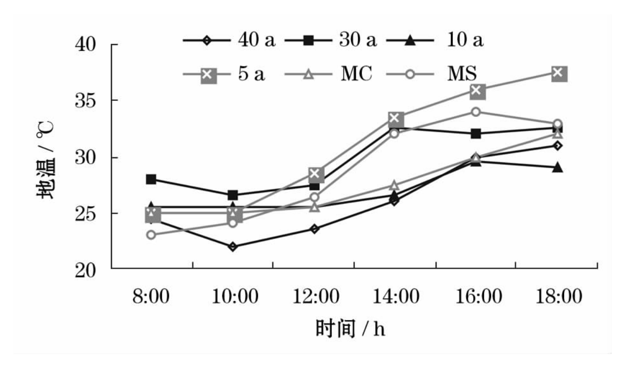


图8 生长季不同林龄梭梭林地下10 cm处地温日变化曲线

Fig. 8 Diurnal variations of soil temperature at depth of 10 cm in *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in growing season

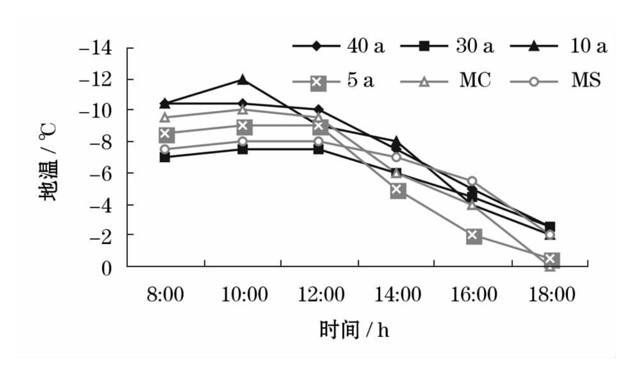


图9 非生长季不同林龄梭梭林地下10 cm处地温日变化曲线

Fig. 9 Diurnal variations of soil temperature at depth of 10 cm in *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in non-growing season

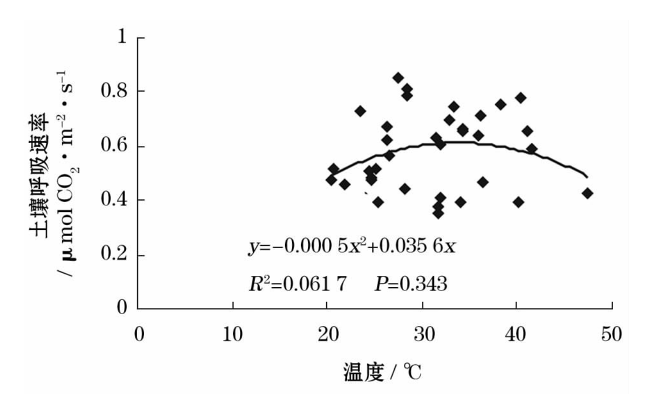


图 10　生长季土壤呼吸与 10 cm 处地温关系图

Fig. 10　Relationships between soil respiration and soil temperature at depth of 10 cm in growing season

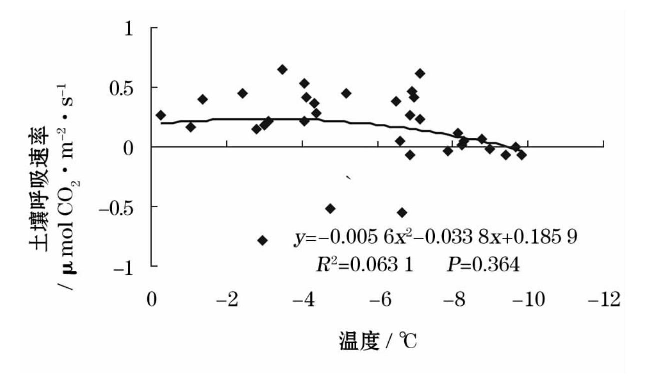


图 11　非生长季土壤呼吸与 10 cm 处地温关系图

Fig. 11　Relationships between soil respiration and soil temperature at depth of 10 cm in non-growing season

地土壤温度均增加,增长幅度不一致,但是相对于其他时间段较为剧烈,幅度在 11.1% ~44.4% 之间;14:00 ~16:00 之间,各样地土壤温度均显著增加,但是增长幅度不一致,增长幅度在 21.4% ~60% 之间;16:00 ~18:00 之间,各样地土壤温度均增加,但是增长幅度不一致,增长幅度在 44.4% ~100% 之间。40 a、30 a、10 a、5 a、*MC*、*MS* 地下 10 cm 的温度最高值比最低值分别提高了 76.19%、66.67%、83.33%、94.44%、100%、75%。

土壤温度被认为是影响土壤呼吸季节变化的主导因素,但是人工梭梭林土壤呼吸与 10 cm 温度之间的相关性并不显著,拟合二次曲线方程也不显著(图 10、图 11),说明土壤温度在干旱区综合自然条件下对人工梭梭林的土壤呼吸的影响不重要。

4　讨 论

4.1　人工梭梭林土壤呼吸速率动态变化特征

本研究表明,石羊河下游荒漠化地区不同林龄人工梭梭林生长季和非生长季土壤呼吸速率日变化均为"单峰型"曲线,与准噶尔盆地[7]、准噶尔盆地南缘天然梭梭群落生长季[8]、准噶尔盆地西北缘[9]、艾比湖流域对梭梭群落[12]的日动态基本一致,但与古尔班通古特沙漠南缘呈双峰曲线[11],新疆三工河流域 8 月份呈双峰曲线,而 6 月和 10 月份呈单峰曲线[13]的研究结果不一致。这可能是由于不同观测时期的降水、干旱情况不同引起的土壤温度与含水量差异[18-19],导致土壤呼吸日动态发生改变[5,20]。石羊河人工梭梭林土壤呼吸速率最大值出现在 12:00 ~14:00,最小值出现在 8:00 左右,与准噶尔盆地西北缘梭梭等荒漠植物群落土壤呼吸速率日变化[9],以及科尔沁沙地植物影响下的土壤呼吸速率日变化[21]相近,可能与梭梭光合作用强烈时地下的呼吸作用也旺盛有关[22]。对比生长季和非生长季土壤呼吸的日变化,生长季(8 月)土壤呼吸显著大于非生长末季(1 月),而且非生长季(1 月)出现负值,则可能是由于 8 月的水热条件较好,根系呼吸强,微生物活动活跃,1 月温度低,土壤微生物活性和根系活动基本停止,土壤空气中没有 CO_2 累积,致使土壤空气与大气基本处于平衡,大气中的 CO_2 被土壤所固定[23-24]。

研究发现石羊河下游人工梭梭林不同林龄土壤呼吸速率生长季变化大体上表现为 *MC* >40 a >30 a >10 a >*MS* >5 a,非生长季表现为 *MC* >40 a >10 a >5 a >30 a >*MS*,说明土壤呼吸速率大体上随着种植年限的增加而递增。人工梭梭林地的土壤呼吸速率基本上显著大于未栽植梭梭的流动沙丘(*MS*),是由于营造梭梭林使得林内土壤得到较好的改善[25]。人工梭梭林经历快速生长期(0 ~17 a)、稳定生长期(17 ~ 20 a)和衰退生长期(20 ~ 33 a)[26],土壤理化性质随种植年限的增加而逐渐改善,在种植年限 28 ~30 a 时效果最明显,以后趋于稳定[27],根系发展成熟,能够充分依靠深层土壤水和地下水生长[28-29],或是 30 a 和 40 a 土壤呼吸差异不大的原因。栽植年限最长的 40 a 梭梭林去结皮处理的林地土壤呼吸速率最高,可能是结皮破坏后土壤含水率增加,促进了梭梭生长,进而增加了土壤呼吸强度[30]。生长季 5 a 梭梭林内土壤吸速率最小(0.354 ~0.476 μmol CO_2·m^{-2}·s^{-1}),可能是因为 5 a 梭梭林栽植密度过大[31],土壤水分的消耗

最多[28]，林内土壤含水率最低，抑制了梭梭生长呼吸。非生长季 30 a 的土壤速率低于 10 a 和 5 a 的，或因该梭梭林已经退化，生长状况较差，而林分更新没有完成，固碳作用减弱，输入的有机质减少，释放出的 CO_2 比其他林龄的都少[26,32]。

4.2 人工梭梭林土壤呼吸的影响因素

前人的研究认为土壤呼吸的主要限制因子是温度和湿度[33-34]；但也有学者认为在干旱、半干旱生态系统土壤含水率对土壤呼吸的影响显著[35]，显示只有在水分胁迫的条件下，土壤呼吸与土壤水分的相关关系才会显著[36]，并且较低的土壤湿度会随温度的增加而抑制土壤呼吸速率[37]。就人工梭梭林而言，风沙土含水率高于 1.3% 才能维持其正常生长[30]。该研究区极度干旱，人工梭梭林现阶段依靠降水形成的浅层土壤水维持生存[38]，雨季出现在生长季且年均降水量远小于蒸发量，非生长季降水稀少并伴有春旱，土壤水分长期处于匮缺状态。本研究表明 0～5 cm 的土壤水分和土壤呼吸速率显著相关，或与该时间的降水有关。

温度是影响土壤呼吸的一个非常重要的环境因子[39]，主要通过影响土壤酶的活性[40]、微生物活性以及植物根系生长进而影响土壤呼吸[41]，尤其对土壤呼吸速率日变化的影响较大[42-43]。在土壤含水率充足、水分不成为限制因子的条件下土壤呼吸和土壤温度呈正相关，而当土壤含水率成为限制因子时水分含量和温度共同起作用[44]，在干旱半干旱地区二者互相牵制，该现象尤其明显[45]。本研究分析土壤呼吸速率和 10 cm 处土壤温度之间无显著关系，这与贾宏涛等在新疆三工河流域的梭梭林地研究发现梭梭林地的土壤呼吸和温度相关性不显著[13]，以及任志国等在黑河下游针对不同植被类型土壤呼吸的研究表明水热因子对土壤呼吸的影响有很大不确定性[46]的结果基本一致。可能是由于在石羊河下游，极端干旱沙地，地下水水位下降[16,47]，土壤含水率和温度之间相互促进相互制约，水分含量和温度共同起作用，从而掩盖了相互关系，导致土壤水含量和土壤温度不是影响土壤呼吸速率的主要单因素。

另外，有学者认为土壤有机碳是影响土壤呼吸空间变异性的关键因子[48-49]。该干旱半干旱区土壤贫瘠，有机质含量较低，碳氮比低，土壤呼吸主要受有机碳的限制[10]。赵鹏等研究该地区人工梭梭群落与水土环境因子的关系，表明作为环境调控因子有机质（9.7%）的作用仅次于土壤水分（10%）[50]。尽管固沙造林是干旱地区固定大气 CO_2 于沙地植被和土壤中的有效途径，但是马全林等研究发现造林恢复 25 a 沙地生态系统的平均固碳速率仅达到 0.53 $Mg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$，远低于草原生态系统的固碳速率 0.30～2.47 $Mg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和我国人工林的平均固碳速率 1.41 $Mg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$，固沙造林还降低了沙化土地土壤有机碳所占比例[51]。FAN 等在该区域针对梭梭林林地土壤属性和植被动态的研究表明，土壤质地和营养在 10 a，20 a，30 a，40 a，50 a 恢复时间序列上呈上升趋势，而土壤有机质含量流动沙丘的 0.1 $g \cdot kg^{-1}$，在初期 0～10 a 快速增长到 1.0 $g \cdot kg^{-1}$，在随后的 10 a～30 a 维持在 0.75～1.0 $g \cdot kg^{-1}$，直到 40 a 才有显著增长，但是 50 a 的土壤表层和浅表层土壤有机质含量还是仅为 1.5～2 $g \cdot kg^{-1}$[52]，说明人工造林后该地区的土壤有机碳含量依然较低。此外，在相近的沙漠区域，LI 等认为植被退化与养分保持能力下降相伴生并加速土壤损失和沙漠化的进程，灌木林地的土壤有机碳（4.18 $g \cdot kg^{-1}$）远小于草地的（8.97 $g \cdot kg^{-1}$）[53]，而天然植被退化、人工林大面积死亡或进一步降低了该地区土壤有机质含量。鉴于此，本研究认为石羊河流域下游该人工梭梭林土壤水分和温度对土壤呼吸的单一因子的影响效应不明显，而土壤有机碳可能是该荒漠生态系统中土壤呼吸的主要驱动因素。

本文只探讨了不同林龄人工梭梭林土壤呼吸在生长季（8 月）和非生长季（1 月）的 8:00～18:00 之间的日变化特征，尽管能准确表达日变化的最大值，但是要更加全面的了解其动态变化的过程还需进行全天不间断的、重复的观测。本实验只有土壤湿度和温度的测量数据具有一定的局限性，还需加深研究土壤有机质含量对土壤呼吸，以及土壤呼吸对土壤温度、湿度和土壤有机碳含量这三个因子的协同响应，才能清晰的把握人工梭梭林林地土壤呼吸的影响机理。

5 结论

石羊河流域荒漠区不同林龄人工梭梭林林在生长季（8 月）和非生长季（1 月）的土壤呼吸日变化曲

线均呈“单峰型”,而且生长季(8 月)的土壤呼吸作用明显强于非生长季(1 月)。显然,梭梭林营造显著提高了沙漠土壤呼吸速率,而且土壤呼吸速率总体随种植年限的增加而增强,改善了沙漠土壤环境质量。同时,去土壤结皮处理显著提高土壤呼吸速率,证明土地沙漠化在短期内会加剧碳排放。在干旱区自然条件下,浅层土壤水分是影响人工梭梭林土壤呼吸的关键因素,而 10 cm 土壤温度不是影响土壤呼吸的关键因素。

参考文献(References)

[1] PREGITZER K S, EUSKIRCHEN E S. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age[J]. Global Change Biology, 2004, 10(12): 2052–2077.

[2] VALENTINI R, MATTENUCCI G, DOLMAN A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests [J]. Nature, 2000, 404(6780): 861–865.

[3] CLAUSSEN E. An effective approach to climate change[J]. Science, 2004, 306(5697): 816–816.

[4] JACOBSON M C. CHARLSON R J. RODHE H, et al. Earth system science: From biogeochemical cycles to global change. International Geophysica Series. 72 [M]. New York: Elsevier Academic Press, 2004.

[5] 王新源,李玉霖,赵学勇,等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890–4901. [WANG Xinyuan, LI Yulin, ZHAO Xueyong, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4890–4901.]

[6] 中国科学院兰州沙漠研究所. 中国沙漠植物志(第一卷)[M]. 北京:科学出版社, 1985: 343. [Lanzhou Desert Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Desert flora, China (Vol. I) [M]. Beijing: Science Press, 1985: 343.]

[7] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等. 准噶尔盆地梭梭群落下土壤 CO_2 释放规律及其影响因子的研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 266–272. [ZHANG Lihua, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Soil carbon dioxide emission and affecting factors under *Haloxylon ammodendron* community in Junggar Basin[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 266–272.]

[8] 谢继萍,钟文昭,黄刚,等. 准噶尔盆地南缘梭梭群落春季融雪期的土壤呼吸动态[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 430–437. [XIE Jiping, ZHONG Wenzhao, HUANG Gang, et al. Dynamic change of soil respiration in *Haloxylon ammodendron* community in southern edge of Junggar Basin in snowmelt season[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 430–437.]

[9] 张丽萍,陈亚宁,李学森,等. 准噶尔盆地西北缘梭梭、假木贼、盐穗木群落土壤呼吸特征比较[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 188–195. [ZHANG Liping, CHEN Yaning, LI Xuesen, et al. Soil respiration characteristic of *Haloxyon ammodendron*, *Anabasis* sp, *Halostachys caspica* community in the northwest Junggar Basin[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(2): 188–195.]

[10] 朱宏,赵成义,李君,等. 柽柳和梭梭林地土壤呼吸研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 148–151. [ZHU Hong, ZHAO Chengyi, LI Jun, et al. Research of soil respiration for desert scrubland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 148–151.]

[11] 杨洁,刘冉,马杰,等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落土壤呼吸对生态系统呼吸的贡献[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 726–733. [YANG Jie, LIU Ran, MA Jie, et al. The contribution of soil respiration to ecosystem respiration of *Haloxylon ammodendron* community in the south of Gurbantunggut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 726–733.]

[12] 杨建军,吕光辉,张燕. 艾比湖流域土壤呼吸日变化及水热因子影响[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(2): 223–231. [YANG Jianjun, LYU Guanghui, ZHANG Yan, et al. Research on soil respiration of different plant communities in Ebinur Lake Basin[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2009, 46(2): 223–231.]

[13] 贾宏涛,朱新萍,盛钰,等. 干旱区 3 种林地生态系统土壤 CO_2 的排放特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 95–98. [JIA Hongtao, ZHU Xinping, SHENG Yu, et al. Characteristics of soil CO_2 emission of 3 kinds of woodland ecosystems in arid areas [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 95–98.]

[14] 朱宏,赵成义,李君,等. 干旱区荒漠灌木林地土壤呼吸及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 856–860. [ZHU Hong, ZHAO Chengyi, LI Jun, et al. Analysis on respiration of soil in scrub lands and its affecting factors in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(6): 856–860.]

[15] 马全林,王继和,纪永福,等. 固沙树种梭梭在不同水分梯度下的光合生理特征[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2120–2126. [MA Quanlin, WANG Jihe, JI Yongfu, et al. Photosynthesis-physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different soil moisture grades[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(12): 2120–2126.]

[16] 王继和,马全林. 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2107–2112. [WANG Jihe, MA Quanlin. Study on restoration strategies, characteristics and status of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* communities at the edge of Minqin oasis[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(12): 2107–2112.]

[17] MA Q L, WANG Y L, LI Y K, et al. Carbon storage in a wolfberry plantation chronosequence established on a secondary saline land in an arid irrigated area of Gansu Province, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(2): 1–15.

[18] WANG X P, ZHANG Y F, WANG Z N, et al. Influence of shrub canopy morphology and rainfall characteristics on stemflow within a

revegetated sand dune in the Tengger Desert, NW China[J]. China Safety Science Journal, 2013, 27(10): 1501 - 1509.

[19] 赵蓉,李小军,赵洋,等. 固沙植被区土壤呼吸对反复干湿交替的响应[J]. 生态学报,2015,35(20):6720 - 6727. [ZHAO Rong, Li Xiaojun, ZHAO Yang, et al. Response of soil respiration to repeated cycles of drying and rewetting in soils of the sand-fixed region of the Tengger Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6720 - 6727.]

[20] 高艳红,张志山,刘立超,等. 水热因子对沙漠地区土壤呼吸的影响[J]. 生态学报,2009,29(11):5995 - 6001. [GAO Yanhong, ZHANG Zhishan, LIU Lichao, et al. Effects of heat and water factors on soil respiration in desert area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5995 - 6001.]

[21] 柴汉魁,冯金朝,景元霞. 科尔沁沙地土壤呼吸空间分布及其变化特征研究[J]. 干旱区地理,2012,35(3):465 - 472. [CHAI Hankui, FENG Jinchao, JING Yuanxia. Spatial distribution and change trait of soil respiration at the dunes in Hoqin Sand Land[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 465 - 472.]

[22] SCHLESER G H. The response of CO_2 evolution from soils to global temperature changes [J]. Zeitschrift Für Naturforschung A, 1982, 37(3): 287 - 291.

[23] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 高寒矮嵩草草甸大气 - 土壤 - 植被 - 动物系统碳素储量及碳素循环[J]. 生态学报,2003,23(4):627 - 634. [ZHANG Jinxia, CAO Guangmin, ZHOU Dangwei, et al. The carbon storgae and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and ainmal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 627 - 634.]

[24] 李虎,邱建军,王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报,2008,24(4):14 - 20. [LI Hu, QIU Jianjun, WANG Ligang. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 14 - 20.]

[25] 席军强,杨自辉,郭树江,等. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响[J]. 草业学报,2015,24(5):44 - 52. [XI Junqiang, YANG Zihui, GUO Shujiang, et al. Effects of *Haloxylon ammodendron* planting on soil physico-chemical properties and soil microorganisms in sandy dunes [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(5): 44 - 52.]

[26] 陈启民,罗青红,宁虎森,等. 古尔班通古特沙漠南缘不同林龄人工梭梭林主林层和更新层特征[J]. 应用生态学报,2017,28(3):739 - 747. [CHEN Qimin, LUO Qinghong, NING Husen, et al. Characteristics of main layer and regeneration layer of *Haloxylon ammodendron* plantations at different ages on the southern edge of the Gurbantunggut Desert, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 739 - 747.]

[27] 罗青红,宁虎森,陈启民. 准噶尔盆地南缘人工梭梭林土壤理化特性时空动态研究[J]. 水土保持研究,2016,23(6):309 - 315. [LUO Qinghong, NING Husen, CHEN Qimin. Spatiotemoral chateristeristic of soil physical and chemical properties in *Haloxylon ammodendron* stand at the southern margin of Jungar basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 309 - 315.]

[28] ZHU Y J, JIA Z Q. Soil water utilization characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation with different age during summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 341 - 346.

[29] ZHOU H, ZHAO W Z, ZHANG G F. Varying water utilization of *Haloxylon ammodendron* plantations in a desert-oasis ecotone[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(4): 825 - 835.

[30] MA Q L, WANG J H, ZHU S J. Effects of precipitation, soil water content and soil crust on artificial *Haloxylon ammodendron* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5057 - 5067.

[31] 朱雅娟,贾志清,刘丽颖,等. 民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征[J]. 中国沙漠,2011,31(2):442 - 446. [ZHU Yajuan, JIA Zhiqing, LIU Liying, et al. Soil water in planted *Haloxylon ammodendron* shrubland of different age outside Minqin oasis[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 442 - 446.]

[32] LIU C A, SIDDIQUE K H M, HUA S, et al. The trade-off in the establishment of artificial plantations by evaluating soil properties at the margins of oases[J]. Catena, 2017, 157: 363 - 371.

[33] 李洪建. 不同生态系统土壤呼吸与环境因子的关系研究[D]. 太原:山西大学,2008. [LI Hongjian. Studies on soil respiration and its relations to environmental factors in different ecosystems [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2008.]

[34] LAVIGNE M B, BOUTIN R, FOSTER R J, et al. Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(9): 1744 - 1753.

[35] CONANT R T, KLOPATEK J M, KLOPATEK C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 383 - 390.

[36] WANG Y S, HU Y Q, JI B M, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(1): 119 - 127.

[37] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 23 - 36.

[38] 李彦,许皓. 梭梭对降水的响应与适应机制—生理、个体与群落水平碳水平衡的整合研究[J]. 干旱区地理,2008,31(3):313 - 323. [LI Yan, XU Hao. Water and carbon balances of *Haloxylon ammodendron*: Intergated study at physiological, plant abd community level[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 313 - 323.]

[39] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall, grass prairie[J]. Nature, 2001, 413(6856): 622 - 625.

[40] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和

不确定性[J]. 生态学报,2011,31(8):2301 - 2311.[YANG Qingpeng,XU Ming,LIU Hongsheng,et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(8):2301 -2311.]

[41] 王光军,田大伦,闫文德,等.改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. 植物生态学报,2009,33(4):739 - 747.[WANG Guangjun,TIAN Dalun,YAN Wende,et al. Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2009,33(4):739 -747.]

[42] RAICH J W,SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology,1992,44(2):81 -99.

[43] 崔玉亭,韩纯儒,卢进登.集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究[J].应用生态学报,1997,8(1):59 -64.[CUI Yuting,HAN Chunru,LU Jindeng,et al. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high-yield agroecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,1997,8(1):59 -64.]

[44] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997,17(5):469 -476.[LIU Shaohui,FANG Jingyun. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects of soil respiration in the global scale[J]. Acta Ecologica Sinica,1997,17(5):469 -476.]

[45] 王红,王邵军,李霁航,等.森林土壤呼吸及其主要调控因素研究进展[J]. 西北林学院学报,2017,32(1):92 - 97.[WANG Hong,WANG Shaojun,LI Wenhang,et al. Characteristics and the influencing factors of forest soil respiration:A rview[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(1):92 -97.]

[46] 任志国,马明国,宋怡.黑河下游五种不同植被类型土壤呼吸的差异性解析[J]. 干旱区地理,2017,40(3):598 -605.[REN Zhiguo,MA Mingguo,SONG Yi. Analytic differences on soil respiration of various vegetation types in the lower reaches of Heihe River Basin[J]. Arid Land Geography,2017,40(3):598 -605.]

[47] 马金珠,魏红. 民勤地下水资源开发引起的生态与环境问题[J]. 干旱区研究,2003,20(4):261 - 265.[MA Jinzhu,WEI Hong. The ecological and environmental problems caused by the excessive exploitation and utilization of groundwater resources in the Minqin Basin,Gansu Province[J]. Arid Zone Research,2003,20(4):261 -265.]

[48] 陈书涛,刘巧辉,胡正华,等.不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学,2013,34(3):1017 - 1025.[CHEN Shutao,LIU Qiaohui,HU Zhenghua,et al. Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes[J]. Environmental Science,2013,34(3):1017 - 1025.]

[49] 秦璐,吕光辉,张雪妮,等.干旱区艾比湖湿地土壤呼吸的空间异质性[J]. 干旱区地理,2014,37(4):704 - 712.[QIN Lu,LYU Guanghui,ZHANG Xueni,et al. Spatial heterogeneity of soil respiration at Ebinur Lake Wetland Nature Reserve in arid area [J]. Arid Land Geography,2014,37(4):704 -712.]

[50] 赵鹏,徐先英,屈建军,等.民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系[J]. 生态学报,2017,37(5):1496 - 1505.[ZHAO Peng,XU Xianying,QU Jianjun,et al. Relationships between artificial *Haloxylon ammodendron* communities and soil-water factors in Minqin oasis-desert ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1496 -1505.]

[51] 马全林,徐丽恒,陈芳,等.干旱区沙漠化逆转过程植被——土壤碳储量的恢复演变规律研究[J]. 地球科学前沿,2018,8(1):48 -59.[MA Quanlin,XU Liheng,CHEN Fang,et al. Restoration changes in organic carbon stocks of the vegetation and soil ecosystems in the reversion process of desertification in arid areas [J]. Frontiers of Earth Science,2018,8(1):48 -59.]

[52] FAN B L,ZHANG A P,YI Y,et al. Long-term effects of xerophytic shrub *Haloxylon ammodendron* plantations on soil properties and vegetation dynamics in northwest China[J]. Plos One,2016,11(12):e0168000.

[53] LI X J,LI X R,WANG X P,et al. Changes in soil organic carbon fractions after afforestation with xerophytic shrubs in the Tengger Desert,northern China[J]. European Journal of Soil Science,2016,67(2):184 -195.

Soil respiration variation characteristics and its relationship with hydrothermic factor of artificial *Haloxylon ammodendron* forest in lower reaches of Shiyang River

WANG Xin-you[1,2], MA Quan-lin[3], JIN Hu-jia[3], FAN Bao-li[3], ZHANG Jin-hu[3], LIN Hui-long[1]

(1 *State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems; Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education; College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China*; 2 *Gansu Radio & TV University, Lanzhou 730030, Gansu, China*; 3 *State Key Laboratory of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China*)

Abstract: Soil respiration is not only one of important indexes of soil biological activity but also a hot issue in the studies of global carbon cycle. In order to reveal the characters of the soil respiration of an artificial *Haloxylon ammodendron* forest at its different life stages (40 a, 30 a, 10 a and 5 a) in the lower reaches of Shiyang River, Gansu Province, China which is located in the typical arid region, the LI-8 100 automated soil CO_2 flux system was used to investigate the daily change of the soil respiration of the forest in both growing and non-growing seasons, with the mobile sand dunes and the artificial *Haloxylon ammodendron* forest after soil crust removal as the control samples. The influence of soil moisture and temperature on its respiration was also evaluated. The four results were found as follows: (1) Diurnal changes in the soil respiration rate of the artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages in both growing and non-growing seasons were showing an obvious single-peak curves with certain volatility. The maximum rate appeared from 12:00 PM to 14:00 PM while the minimum around 8:00 AM. (2) Planting *Haloxylon ammodendron* forest and breaking soil crusts significantly improved the respiration rate of the desert soil and the respiration rates of the forest in different life stages generally were progressively increased with the planting age, following a descent order as $MC > 40\ a > 30\ a > 10\ a > MS > 5\ a$ in the growing season and $MC > 40\ a > 10\ a > 5a > 30\ a > MS$ in the non-growing season respectively. (3) There are obvious seasonal variations in the soil respiration rate of the artificial *Haloxylon ammodendron* forest at different life stages. The value of the rate in the growing season (August) is much higher than that in the non-growing season (January). (4) The correlation analysis showed that the soil respiration rate (Y) of artificial *Haloxylon ammodendron* forest was significantly correlated with the soil water content (X) at the depth from 0 to 5cm in both growing and non-growing seasons. Their relationships were described by the following square curve regression equations: $Y = -0.2058X^2 + 0.9465X - 0.3166$ ($R^2 = 0.5062$, $P = 0.0417$) for the growing season and $Y = 0.1187X^2 + 0.1563X + 0.1188$ ($R^2 = 0.6757$, $P = 0.0011$) in the non-growing season, respectively. However, there were no significant correlations between soil respiration rate and soil temperature at 10 cm depth. Thus, the soil water content is the critical factor for soil respiration of artificial *Haloxylon ammodendron* forest. The findings further proved the importance of planting *Haloxylon ammodendron* forest to promote the biological activity and carbon flux in the desert soil. Nevertheless, degradation of artificial *Haloxylon ammodendron* forest and land desertification reflected by the destructed soil crusts will inevitably increase carbon emission in the short run. Therefore, artificial afforestation in desert areas and soil crust protection in this process as well as effective forest administration should be adopted to reduce CO_2 emissions.

Key words: artificial *Haloxylon ammodendron* forest; soil respiration; lower reaches of Shiyang River; diurnal variation